

*Пасько В.В.*

*<sup>1</sup>Західноукраїнський національний університет*

## **АДАПТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТРИВИМІРНОГО РЕНДЕРИНГУ В ДОДАТКАХ ВІРТУАЛЬНОЇ РЕАЛЬНОСТІ**

**Вступ.** У сучасному світі технологій віртуальної реальності (VR) потреба у високоякісному та продуктивному відтворенні тривимірних моделей стає дедалі критичною. Для створення переконливих VR-сцен необхідно застосовувати алгоритми рендерингу, які забезпечують не лише реалістичну візуалізацію, але й достатню продуктивність, щоб уникнути затримок і зменшити втому користувача. Метою цієї роботи є дослідження існуючих підходів до рендерингу тривимірних моделей у VR-системах, обґрунтування вибору певних алгоритмів та подальший розвиток оптимізованих рішень.

**Мета:** провести аналіз сучасних технологій рендерингу у VR, виділити ключові алгоритми з огляду на якість і продуктивність, а також навести перспективи їх вдосконалення.

### **1. Аналіз сучасних адаптивних технологій рендерингу тривимірних моделей для систем віртуальної реальності**

Процес рендерингу тривимірних моделей у VR вимагає високої обчислювальної потужності, оскільки користувач взаємодіє з повноцінним тривимірним середовищем у режимі реального часу. При цьому обробляються тисячі об'єктів, текстур, освітлювальних ефектів та динамічних тіней у кожному кадрі. Особливістю VR є необхідність рендерити зображення окремо для кожного ока (стереоскопічне бачення), що подвоює навантаження на графічну підсистему.

Одним із базових методів візуалізації залишається растеризація. Вона широко використовується у таких рушіях, як Unity та Unreal Engine, і дозволяє швидко трансформувати 3D-геометрію у 2D-проекцію. Основна перевага – висока швидкодія, однак метод менш придатний для фізично точного моделювання світла та відбиттів. З огляду на потребу у фотореалістичності, особливо в архітектурній візуалізації або VR-тренажерах, зростає роль трасування променів (ray tracing).

Трасування променів, реалізоване через RTX-технології NVIDIA [1], імітує фізику розповсюдження світла. В умовах VR його комбінують з растеризацією у гібридному підході, що дозволяє отримати складні оптичні ефекти при збереженні продуктивності [2].

Такий підхід забезпечує компроміс між якістю зображення та швидкодією. Архітектура RTX Hybrid Rendering підтримується сучасними VR-шоломами, зокрема HTC Vive Pro та Meta Quest 3 через Link.

Для досягнення стабільної частоти кадрів застосовується адаптивна деталізація сцени (Level of Detail, LOD). Принцип роботи LOD полягає у заміні складних 3D-моделей на спрощені варіанти залежно від відстані до глядача. Це дозволяє рендерити віддалені об'єкти з меншою кількістю полігонів, не втрачаючи візуальної якості. У VR, де користувач може швидко змінювати

напрямок огляду, ефективна LOD-система є обов'язковою умовою.

Крім того, VR-рушії реалізують алгоритми відсічення об'єктів (culling):

- Back-Face Culling пропускає полігони, що обернені від камери;
- Frustum Culling ігнорує об'єкти, що повністю за межами поля зору;
- Occlusion Culling не рендерить об'єкти, які повністю закриті іншими.

Ці технології дозволяють уникати обробки непотрібних елементів сцени, що суттєво знижує навантаження на GPU і покращує реактивність VR-середовища.

В останні роки особливої популярності набуває Foveated Rendering – інноваційна технологія, що адаптує якість рендерингу до положення погляду користувача. За допомогою трекінгу очей (eye-tracking) визначається фовеальна зона (зона максимальної гостроти зору), у якій виконується рендеринг з максимальною роздільною здатністю. У периферійних зонах застосовується понижена якість. Такий підхід знижує обчислювальні витрати до 40% без помітного погіршення якості зображення [3].

Ще одним ключовим елементом є шейдери – спеціальні програми, що керують обчисленням кольору пікселів, освітленням, ефектами матеріалів. Спрощення шейдерів, а також передрендеринг фонових ефектів, дозволяє скоротити затримки при рендерингу сцени. Наприклад, попередньо обчислене глобальне освітлення (baked GI) широко використовується в стаціонарних VR-сценах.

Таким чином, ефективний рендеринг у VR є результатом інтеграції численних методів і оптимізацій: від класичної растеризації до трасування променів, від LOD до foveated rendering, а також використання сучасних графічних API (DirectX 12, Vulkan, OpenXR).

**Висновок.** Проведений огляд показав, що для систем віртуальної реальності найбільш перспективними є технології, які адаптують рендеринг до особливостей сприйняття людини (наприклад, фовеальний рендеринг), а також технології, що динамічно оптимізують сцену (LOD, culling). Комбінування таких підходів з апаратними та алгоритмічними оптимізаціями створює можливість реалізації реалістичного рендерингу у режимі реального часу навіть на обмежених ресурсах. У подальшому доцільно розробляти власні впровадження цих алгоритмів, тестувати їх в контексті VR-систем, особливо з урахуванням адаптації до різних платформ (мобільних, стаціонарних). Вдосконалення цих напрямів відкриє шлях до більш глибокої інтеграції 3D-рендерингу у VR-додатки, архітектурні візуалізації, симуляції та інші прогресивні області.

### Перелік використаних джерел.

1. NVIDIA Developer. NVIDIA RTX Real-Time Ray Tracing. <https://developer.nvidia.com/rtx>
2. Guo H. The Application of Virtual Reality Technology and Real-Time Rendering on Modern Platforms. CAD Journal, 2024, Vol. 21(S28), pp. 238–251.
3. Wang L., Shi X., Liu Y. Foveated Rendering: A State-of-the-Art Survey. arXiv preprint arXiv:2201.02777, 2022.